©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Vertikalgradient und Gesteinsdichte im Schlegeisgrund (Zillertaler Alpen) auf Grund von Stollenmessungen[1])

Von W. EHRISMANN[2]), O. ROSENBACH[2]) und P. STEINHAUSER[3])

Mit 4 Abbildungen

(Vorgelegt in der Sitzung der m.-n. Klasse am 29. Mai 1969 durch k. M. Toperczer)

Zusammenfassung: Bei gravimetrischen Untersuchungen in den Ostalpen hat sich im Zillertal die Möglichkeit zu Spezialmessungen über und unter Tage ergeben. Diese sind gezielt zur Bestimmung von Gesteinsdichte und Vertikalgradient angesetzt worden. Die gravimetrisch bestimmte Dichte fügt sich gut in das geologische Bild ein. Der Vertikalgradient ist um ca. 6% größer als der Normalgradient; die Konsequenzen für den geologischen Aufbau und für die Reduktion gravimetrischer Meßergebnisse werden diskutiert.

I. Einleitung

Seit 1962 werden in den Ostalpen großräumige gravimetrische Untersuchungen im Hinblick auf die Erforschung des Alpenbaues durchgeführt. Da die Messungen im Hochgebirge erfolgen, treten naturgemäß Fragen bezüglich der Zuverlässigkeit der angewandten Reduktionsverfahren auf. Dies betrifft vor allem den Betrag des Vertikalgradienten und die Reduktionsdichte.

Voraussetzung für die Bestimmung der Freiluftreduktion ist die Kenntnis des wahren Vertikalgradienten; überdies benötigt ihn die Geodäsie unter anderem zur Korrektur der Nivellements und zur Geoidbestimmung.

[1]) Beitrag Nr. 119 zum Schwerpunktprogramm „Geophysikalische Erforschung des tieferen Untergrundes in Mitteleuropa" der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

[2]) Institut für Geophysik der TU Clausthal.

[3]) Lehrkanzel für Geophysik der Universität Wien, derzeit beurlaubt an das Institut für Geophysik der TU Clausthal.

Die Reduktionsdichte wird oft unter Verwendung von Gesteinsproben aus dem Untersuchungsgebiet ermittelt, wobei allerdings die derart gewonnenen Werte auf Grund der Einflüsse von Verwitterung und Bergfeuchte bzw. Druckentlastung von der wahren Dichte der Gesteine in situ beträchtlich abweichen können. Für gravimetrische Reduktionen repräsentative Dichtewerte lassen sich mit Hilfe von Schweremessungen selbst nach dem von Nettleton angegebenen Prinzip oder aus Messungen in korrespondierenden Punkten über und unter Tage gewinnen, d. h. solchen Punkten, die auf einer Lotlinie liegen.

In den Zillertaler Alpen hat sich die Gelegenheit zu Spezialmessungen im Schlegeisgrund ergeben, die zur Bestimmung des örtlichen Vertikalgradienten und der Gesteinsdichte geeignet sind, worüber in dieser Arbeit berichtet wird.

II. Die Beziehung zwischen Vertikalgradient und mittlerer Dichte

Ändert sich an einer Grenzfläche die Dichte um den Betrag $\Delta\sigma$, so ändert sich bekanntlich der Vertikalgradient $\frac{\partial g}{\partial h}$ ebenfalls unstetig um:

$$\Delta\frac{\partial g}{\partial h} = 4\pi k \Delta\sigma \cos^2\alpha \tag{1}$$

mit k Gravitationskonstante

α . . Neigungswinkel der Grenzfläche gegen die Horizontale.

Ausgehend von dieser Beziehung können die Dichte σ und der Vertikalgradient im Gesteinsverband mit dem Normalgradienten ($\sigma \sim 0$) verknüpft werden. Dazu benötigt man Schweremessungen in korrespondierenden Punkten über und unter Tage. Mit der Erdoberfläche als Unstetigkeitsfläche der Dichte gilt mit $\alpha = 0$:

$$4\pi k\sigma = \left(\frac{\partial g}{\partial h}\right)_{\text{Luft}} - \left(\frac{\partial g}{\partial h}\right)_{\text{Gesteinsverband}} \tag{2}$$

Entsprechend der gravimetrischen Meßpraxis, Schweredifferenzen zu bestimmen, lautet Beziehung (2) in Differenzenquotienten ausgedrückt:

$$4\pi k\bar{\sigma} = F - \frac{g_u - g_o}{H} \tag{3}$$

$g_u - g_o$. Schweredifferenz zwischen unter- und obertägigem Gravimeterpunkt

H . Mächtigkeit der Gesteinsplatte zwischen den Meßpunkten

F Vertikalgradient in freier Luft

$\bar{\sigma}$ mittlere Dichte der Gesteinsplatte.

Die Gleichung (3) wird üblicherweise zur Bestimmung der mittleren Dichte $\bar{\sigma}$ benutzt, indem man für F den ungestörten Vertikalgradienten von 3086 E ansetzt [1, 2]. Für ein Störgebiet vom Ausmaß der Alpen ist dieser Ansatz jedoch mit Sicherheit nicht allgemein zulässig, so daß seine Verwendung zwangsläufig zu falschen Dichtewerten führen würde.

Die Gleichung (3) kann andererseits zur Bestimmung des Vertikalgradienten F benutzt werden, wenn die mittlere Gesteinsdichte $\bar{\sigma}$ unabhängig in anderer Weise bestimmt worden ist. Derart sind die Schweredaten vom Schlegeisgrund bearbeitet worden.

III. Meßgebiet Schlegeisgrund und Stationslage

Im Bereich des Stollensystems der zur Zeit in Bau befindlichen Zemmkraftwerke der Tauernkraftwerke AG ergab sich die günstige Möglichkeit, im Herbst 1968 und im Frühjahr 1969 ober- und untertägige gravimetrische Messungen durchzuführen. Einen Übersichtsplan des Meßgebietes zeigt Abb. 1; die detaillierte Lage der Meßstationen ist aus Abb. 2 zu ersehen.

Die untertägigen Meßpunkte 301—305 bilden ein von der Talsohle aus fast horizontal in den unteren Teil der Talflanke hineinreichendes Profil. Obertägig verläuft in Höhe des Betonier-

Tabelle 1. Stationsdaten der gravimetrischen Meßpunkte im Schlegeisgrund.

Punkt-Nr.	geograph. Breite	geograph. Länge	Höhe über der Adria
a) untertägige Meßpunkte[1])			
301	47° 2,44′	11° 42,24′	1657,56 m
302	47° 2,39′	11° 42,25′	1658,06 m
303	47° 2,33′	11° 42,26′	1658,52 m
304	47° 2,30′	11° 42,31′	1659,01 m
305	47° 2,25′	11° 42,36′	1659,55 m
b) obertägige Meßpunkte[2])			
306	47° 2,30′	11° 42,33′	1710,76 m
307	47° 2,29′	11° 42,32′	1709,62 m
308	47° 2,28′	11° 42,31′	1706,29 m
309	47° 2,44′	11° 42,23′	1783,85 m

[1]) Die angegebene Höhe bezieht sich auf das Meßsystem des Gravimeters; die Stollensohle liegt 65 cm tiefer.

[2]) Die angegebene Höhe bezieht sich auf das Meßsystem des Gravimeters; die Erdoberfläche liegt 60 cm tiefer.

abschnittes 15 das Querprofil der Punkte 306—308 mit einer Stollenüberdeckung von ca. 50 m. In der Nähe des Betonierabschnittes 41 liegt der Gravimeterpunkt 309 etwa 125 m oberhalb des Stollens.

Die genauen Daten zur Lage der Stationen sind der Tab. 1 zu entnehmen, wofür die Tauernkraftwerke AG ihre Vermessungsunterlagen großzügigerweise zur Verfügung stellten.

Im Zusammenhang mit Abb. 2 ist daraus zu ersehen, daß teilweise geringfügig interpoliert werden mußte, um korrespondierende Wertepaare zu erhalten; diese geringfügigen Interpolationen konnten nicht vermieden werden, da der Baustellenbetrieb andere Stationslagen nicht zuließ. Ein anschauliches Bild der relativen Lage der einzelnen Meßpunkte liefert ein Vertikalschnitt gemäß Abb. 4.

IV. Gravimetrische Messungen und Reduktionen

a) Durchführung der Messung und Genauigkeit

Die Schweremessungen wurden mit einem Gravimeter vom Typ Worden-Master durchgeführt. Als Meßverfahren ist eine Sprung-Step-Methode zur Anwendung gekommen, bei der die Messungen an den einzelnen Punkten so oft wiederholt worden sind, bis eine einwandfreie Gangkurve gesichert war. Nach 2 bis 5 Wiederholungsmessungen je Meßpunkt ist dies bei recht geringer Streuung der einzelnen Beobachtungswerte erreicht worden, die um nicht mehr als 0,01—0,02 mgal von der Gangkurve abweichen. Daher kann die Schweredifferenz zwischen je zwei korrespondierenden Punkten entsprechend der Meßgenauigkeit bis auf etwa ±0,02 mgal genau bestimmt werden. Dies bedeutet, daß der Vertikalgradient bei einem Höhenintervall von 100 m nur mit einem Fehler von ±2 E behaftet ist.

b) Reduktionen

Gezeiteneinfluß: Bei dieser Auswertung werden an den Meßdaten auch die Gezeitenkorrekturen angebracht [3].

Topographische Reduktion: Aus den gemessenen Schwerewerten kann der topographisch nicht reduzierte Vertikalgradient sofort abgeleitet werden. Dieser ist aber sehr stark durch die Geländeform in Punktnähe beeinflußt, was seine Aussagekraft hinsichtlich der Massenlagerung im Untergrund sehr beeinträchtigt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen die Meßwerte topographisch reduziert werden.

Für die topographische Reduktion wurde das Gelände bei den obertägigen Punkten bis 200 m Entfernung von der Station tachymetrisch aufgenommen und für größere Distanzen aus dem im Literaturverzeichnis angegebenen Kartenmaterial festgelegt. Die Berechnung der topographischen Reduktion erfolgte nach dem von EHRISMANN, MÜLLER, ROSENBACH und SPERLICH [4] angegebenen Verfahren.

Auch bei den untertägigen Punkten ist der Einfluß der Topographie zu berücksichtigen. Da die zwischen den beiden übereinanderliegenden Meßpunkten befindliche Gesteinsplatte nach Gleichung (3) zur Bestimmung des Vertikalgradienten im Gestein benötigt wird, muß auch in diesem Fall das Gelände im Niveau des obertägigen Punktes eingeebnet werden. Hierbei weicht die Vorzeichenverteilung bei den rechnerischen Massenbewegungen von der üblichen Geländereduktion für obertägige Punkte ab, wie der Abb. 3 zu entnehmen ist.

Die Unterschiedlichkeit der Wirkung eines Massenelementes auf die beiden korrespondierenden Punkte nimmt rasch mit wachsender Entfernung ab. Es war daher ausreichend, die topographische Reduktion für jeden Punkt nur für einen Umgebungsbereich von 18 × 18 km auszuführen. In größeren Distanzen stimmt die Geländereduktion für ober- und untertägige Punkte

Tabelle 2. Schwerewerte und Reduktionsdaten

Meßpunkt	beobachteter Schwerewert mgal	Stollenreduktion[1]) mgal	Geländereduktion[1]) Nahbereich mgal	Geländereduktion[1]) Fernbereich mgal	Geländehöhe[2]) m
a) untertägige Meßpunkte					
301	980295,92	0,01	1,80	8,60	1783,25
301	295,92	0,01	4,46	9,07	1709,02
302	297,63	0,01	3,36	9,17	1709,02
303	301,02	0,01	2,44	9,04	1709,02
304	304,29	0,01	1,44	8,60	1709,02
305	307,33	0,01	1,11	8,49	1709,02
b) obertägige Meßpunkte					
306	980302,37	0,00	0,15	8,01	1710,16
307	302,48	0,00	0,13	8,06	1709,02
308	302,89	0,00	0,16	8,17	1705,69
309	288,55	0,00	0,33	7,74	1783,25

[1]) Reduktionsdichte $\sigma = 1$ g/cm³.
[2]) Geländeniveau nach Ausführung der topographischen Reduktion.

bis auf einen Betrag der Größenordnung von 10^{-3} bis maximal 10^{-2} mgal praktisch überein [2].

Stollenwirkung: Für sämtliche Meßpunkte ist der gravimetrische Einfluß der verschiedenen in Abb. 2 dargestellten Stollen bestimmt worden. Dazu wurden die Stollen durch Quader gleicher Querschnittsfläche approximiert und rechnerisch aufgefüllt.

c) Ergebnisse

Das auf diese Weise gewonnene gravimetrische Datenmaterial ist in Tab. 2 wiedergegeben.

V. Bearbeitung der Meßergebnisse

a) Dichte

Die am Schlegeisgrund durchgeführten Stollenmessungen ermöglichen die Dichtebestimmung unter Verwendung des Nettletonschen Prinzips. Dazu wird mittels der topographischen Reduktion der Hang rechnerisch eingeebnet. Wegen der Kürze des Meßprofils und wegen der horizontalen Lage der Punkte kann die großräumige Anomalie als konstant vernachlässigt werden. Wie aus Abb. 4 zu ersehen ist, weisen die Bouguer-Anomalien dann die geringste Beziehung zur Topographie auf, wenn die Reduktionsdichte $\sigma = 2{,}65\ \mathrm{g/cm^3}$ verwendet wird. Jedoch muß bei dieser Untersuchung zunächst der Punkt 305, der die geringste Überdeckung hat, außer Betracht bleiben.

Dieser Dichtewert stimmt gut mit der Dichte $\sigma = 2{,}67\ \mathrm{g/cm^3}$ überein, die aus Handstücken abgeleitet worden ist, welche aus dem Haufwerk beim Stollenschlag entnommen worden sind. Dabei muß auch der gleichmäßige Verlauf der Bouguer-Anomalie hervorgehoben werden; diese Gleichmäßigkeit stellt wohl einen Hinweis dafür dar, daß die Augengranitgneise, die diesen Talbereich aufbauen, weitgehend ungestört gelagert sind.

b) Vertikalgradient

Unter Verwendung des hier gewonnenen Dichtewertes kann aus Gleichung (3) der gravimetrische Vertikalgradient berechnet werden. Dabei wird der Gradient sowohl ohne, als auch mit topographischer Reduktion abgeleitet. In beiden Fällen muß der Vertikalgradient im Gesteinsverband zuerst bestimmt werden. Hierbei muß die Wirkung des in der Luft verlaufenden Teils der Meßstrecke berücksichtigt werden, welche sich aus der Höhe des Meßsystems über der Erdoberfläche ergibt. Der deshalb zu subtra-

hierende Schwerewert wird zunächst mit Hilfe des Normalgradienten abgeschätzt und dann iterativ mit dem neubestimmten Gradienten verbessert. Ferner wird beim topographisch nichtreduzierten Vertikalgradienten auch die Neigung der Erdoberfläche gegen die Horizontale berücksichtigt.

Die Ausgangswerte und die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tab. 3 angeführt. Dabei sind die Daten für die Lotlinien A bzw. B aus den Stationsstrecken 301 bis 309 bzw. 304 bis 307 durch Interpolation gewonnen worden, wie es auch Abb. 4 entnommen werden kann.

Tabelle 3. Die Berechnung des Vertikalgradienten unter Verwendung der Reduktionsdichte $\sigma = 2{,}65\ g/cm^3$.

	Lotlinie A	Lotlinie B
Mächtigkeit der Gesteinsschicht	125,69 m	49,95 m
Neigung der Erdoberfläche	10° 30′	14° 30′
Im Gestein gemessene Schweredifferenz:		
ohne topographische Reduktion	7,24 mgal	3,21 mgal
mit topographischer Reduktion	13,41 mgal	6,78 mgal
Vertikalgradient im Gestein:		
ohne topographische Reduktion	576 E	642 E
mit topographischer Reduktion	1066 E	1357 E
Vertikalgradient in freier Luft:		
ohne topographische Reduktion	2722 E	2725 E
mit topographischer Reduktion	3286 E	3577 E

Alle hier angegebenen Gradienten stellen selbstverständlich Mittelwerte aus den längs diesen Meßstrecken tatsächlich auftretenden Gradienten dar. In welchem Punkt der Meßstrecke dieser Mittelwert genau erfüllt ist, kann nicht exakt angegeben werden.

VI. Diskussion der Ergebnisse

a) Vertikalgradient und Gesteinsdichte

Die hier errechneten Freiluftgradienten ohne topographische Reduktion sind um ca. 12% kleiner als der Normalgradient. Dies kann zwanglos aus dem alles andere überwiegenden Einfluß der konkaven Geländeform gedeutet werden, die auf die Größe des Vertikalgradienten dämpfend wirkt. Es fällt aber bereits hier auf, daß die einheitliche Gradientengröße bei differierenden Gesteinsgradienten nur mittels der ausgleichenden Wirkung der Geländeneigung erreicht wird.

Erst nach der rechnerischen Beseitigung der Geländewirkung treten auch andere Effekte hervor. Dann sind beide Gradienten unterschiedlich groß und übertreffen den Normalgradienten um 6,5 bzw. 16%. Die Ursache dieser Größendifferenz muß wohl im unterschiedlichen geologischen Aufbau der beiden vertikalen Meßstrecken gesucht werden. So verläuft die Lotlinie A vollständig durch gewachsenen Fels, während im Bereich der Lotlinie B der Geländezustand auf die Existenz größerer Mengen von Hangschotter und Baustellenschutt hinweist, die oberflächlich sichtbar sind.

Unter der Voraussetzung, daß der Vertikalgradient der Meßstrecke A für den gesamten Untersuchungsbereich repräsentativ ist, kann mit diesem Wert für die Meßstrecke B die Gesteinsdichte aus Gleichung (3) berechnet werden. Es ergibt sich eine mittlere Dichte von 2,25 g/cm³.

Bei einem durchschnittlichen Porenvolumen von 30% erreichen Schotter aus Augengranitgneis eine Dichte von etwa 1,85 g/cm³. Demnach kann angenommen werden, daß im Bereich der Lotlinie B die Stollenüberdeckung etwa zur Hälfte aus Fels bzw. aus Schutt sowie Schottermassen aufgebaut ist. Auf die Richtigkeit dieser Erklärung deutet auch in Abb. 4 das Verhalten der Bouguer-Anomalie des Punktes 305 hin. Wenn im Nahbereich dieses Punktes mit der Reduktionsdichte 1,85 gearbeitet wird, dann verringert sich die Bouguer-Anomalie um 0,9 mgal und fügt sich wesentlich besser in die horizontale Ausgleichsgerade der anderen Stollenpunkte.

b) Mögliche Ursachen der Störung des Vertikalgradienten

Ohne die Vieldeutigkeit potentialtheoretischer Aussagen übersehen zu wollen, soll nun eine Deutung dieses Ergebnisses versucht werden.

Auf die Schwerkraft nimmt die Wirkung eines Störkörpers bekanntlich mit der zweiten Potenz der Entfernung ab. Beim Vertikalgradienten erfolgt diese Abnahme mit der dritten Potenz und bei der zweiten Ableitung der Schwerkraft sogar mit der vierten Potenz der Entfernung. Folglich zeigt die Schwerkraft vor allem die Wirkung großer und tiefliegender Massen. Beim Vertikalgradienten werden Störmassen in mittleren Tiefen und bei der zweiten Ableitung relativ oberflächennahe Störkörper bevorzugt in Erscheinung treten [5].

Deshalb könnte der hier beobachtete übergroße Vertikalgradient auf einen Störkörper hoher Dichte in mittlerer Tiefe hinweisen und muß nicht unbedingt auf die großräumige Alpen-

struktur zurückgeführt werden. Oberflächennahe Störkörper dürften auch auf Grund des ruhigen Bouguer-Anomalienverlaufs in Abb. 4 als Ursache ausscheiden. Um klare Aussagen machen zu können, sind weitere gravimetrische Messungen in der näheren und weiteren Umgebung des Zillertals unbedingt notwendig.

c) Bedeutung für die gravimetrischen Reduktionen

Wie bereits einleitend erwähnt worden ist, besitzt der Vertikalgradient auch für die Reduktionsverfahren einige Bedeutung. Wenn die den übergroßen Vertikalgradienten hervorrufende Störmasse, wie in diesem Fall vermutet werden kann, unterhalb des Reduktionsniveaus liegt, dann kann auch angenommen werden, daß der Freiluftgradient über den gesamten Reduktionsweg eher dem tatsächlich beobachteten Wert als dem Normalgradienten nahekommt. Bei einem Reduktionsniveau in der Höhe des Meeresspiegels bedeutet dies für das Zillertal, daß die negativen Schwereanomalien um etwa 35 mgal zu klein angegeben worden sind. Dabei wird der für die Lotlinie A genannte Vertikalgradient als repräsentativ angesehen; der in Tab. 3 für Lotlinie B angeführte Wert ist nach der oben durchgeführten Diskussion für diese Überlegungen gegenstandslos.

Referenzen

Wir danken für wohlwollende Unterstützung und Förderung der gravimetrischen Feldmessungen folgenden Institutionen:
Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen Wien, Abt. K 2, Vorstand Hofrat Dr. J. Mitter
Österreichisches Bundesheer
Tauernkraftwerke AG, Salzburg, Abt. B. V Leiter Dipl.-Ing. E. Kropatschek

Die vorliegende Arbeit stellt ein Teilergebnis von gravimetrischen Untersuchungen im Alpenraum dar, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt werden, wofür wir sehr zu Dank verpflichtet sind.

Literatur

(1) Bodemüller, H.: Der Schwereunterschied in korrespondierenden Punkten über und unter Tage. Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 8, 1954.

(2) Rische, H.: Dichtebestimmung im Gesteinsverband durch Gravimeter- und Drehwaagenmessungen unter Tage. Freiberger Forschungsheft C 35, 1957.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

(3) Geophysical Prospecting, Tidal Gravity Corrections for 1968. Service Hydrographique de la Marine et Compagnie Générale de Géophysique. Vol. XV, Supplement No. 1, 1967.

(4) EHRISMANN, W., G. MÜLLER, O. ROSENBACH and N. SPERLICH: Topographic Reduction of Gravity Measurements by the Aid of Digital Computers. Boll. Geofis. teor. ed appl., Vol. VIII, Nr. 29, 1966.

(5) HAALCK, H.: Welche gravimetrischen Bestimmungsstücke ergeben durch die Darstellung ihrer örtlichen Verteilung das deutlichste Bild von den die Schwerestörung verursachenden Dichteungleichheiten im Untergrund. Beiträge zur Angewandten Geophysik, Bd. 10, 1943.

Kartenmaterial

SCHLEUSENER, A.: Karte der mittleren Höhen von Zentraleuropa, DGK, Reihe B, Nr. 60, 1949.

SENFTL, E.: Karte der mittleren Geländehöhen von Österreich, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien 1965.

Topographische Karte von Österreich 1:25.000, 1:50.000.

Alpenvereinskarte Zillertaler Alpen, DAV und ÖAV, 1958.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

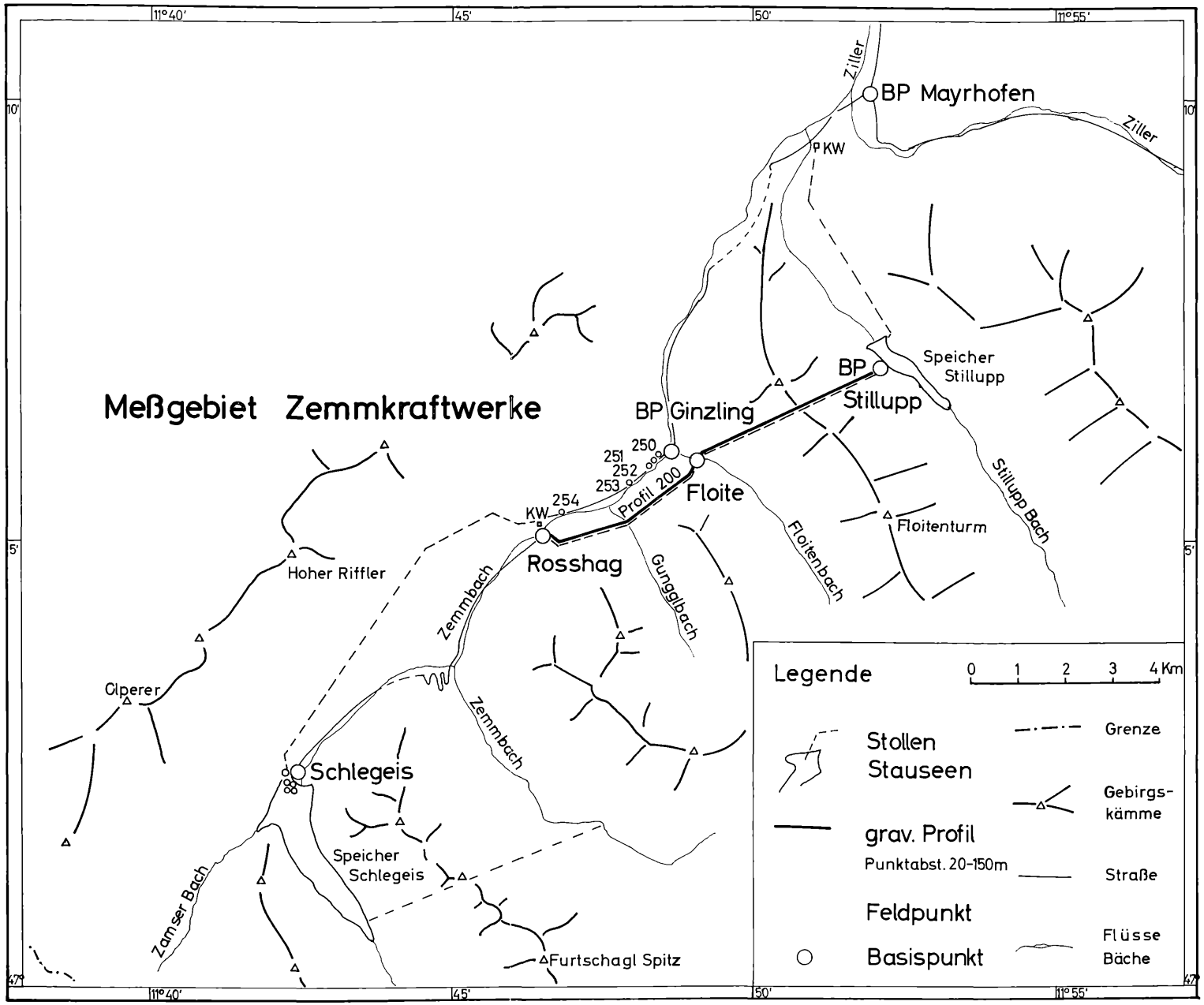

Abb. 1: Meßgebiet Zemmkraftwerke. Zur Bestimmung des Vertikalgradienten ist nur das Datenmaterial des Meßbereiches Schlegeis verwendet worden.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

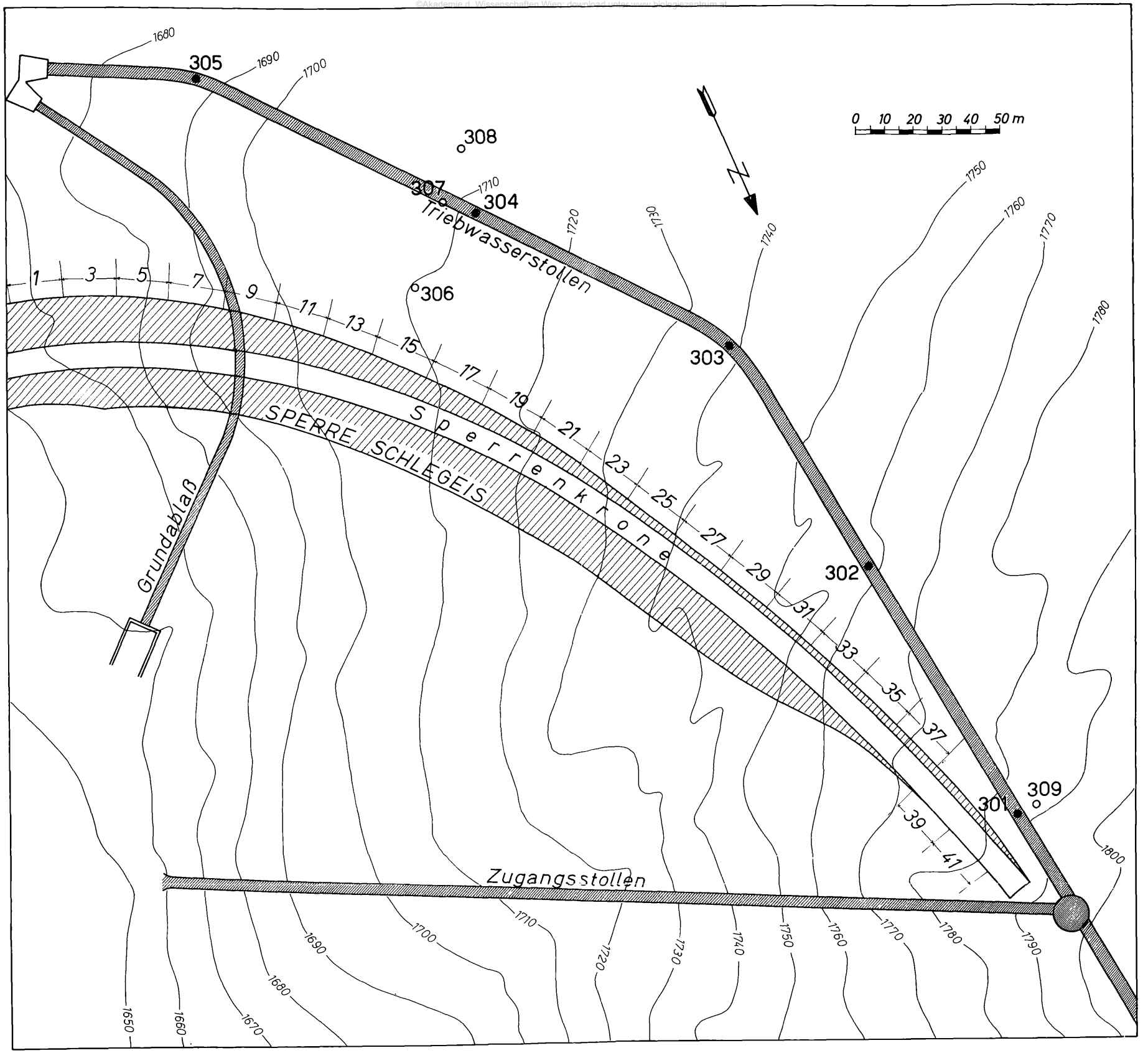

Abb. 2: Lage der Meßpunkte im Bereich der Sperrenbaustelle Schlegeis. ● untertägige Meßpunkte ○ obertägige Meßpunkte.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

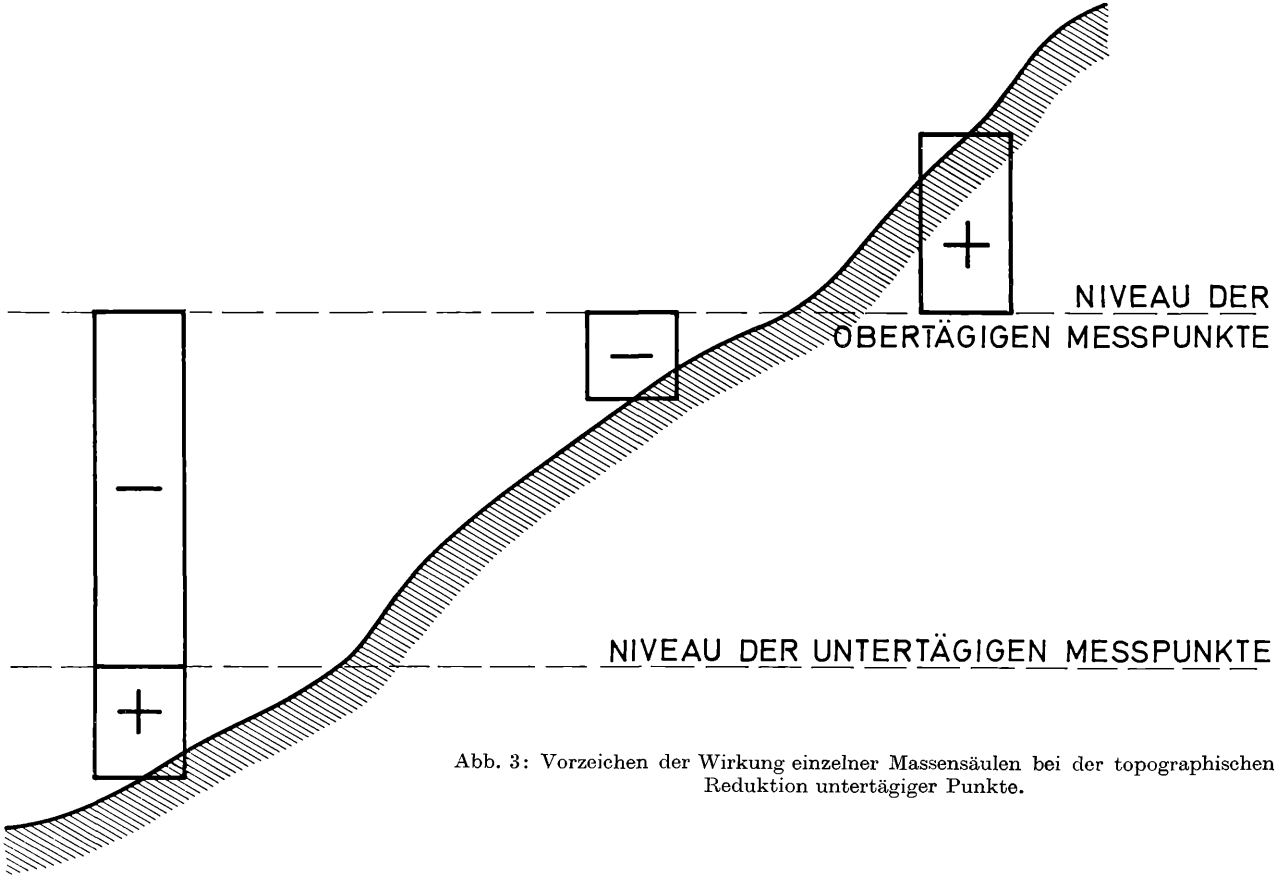

Abb. 3: Vorzeichen der Wirkung einzelner Massensäulen bei der topographischen Reduktion untertägiger Punkte.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

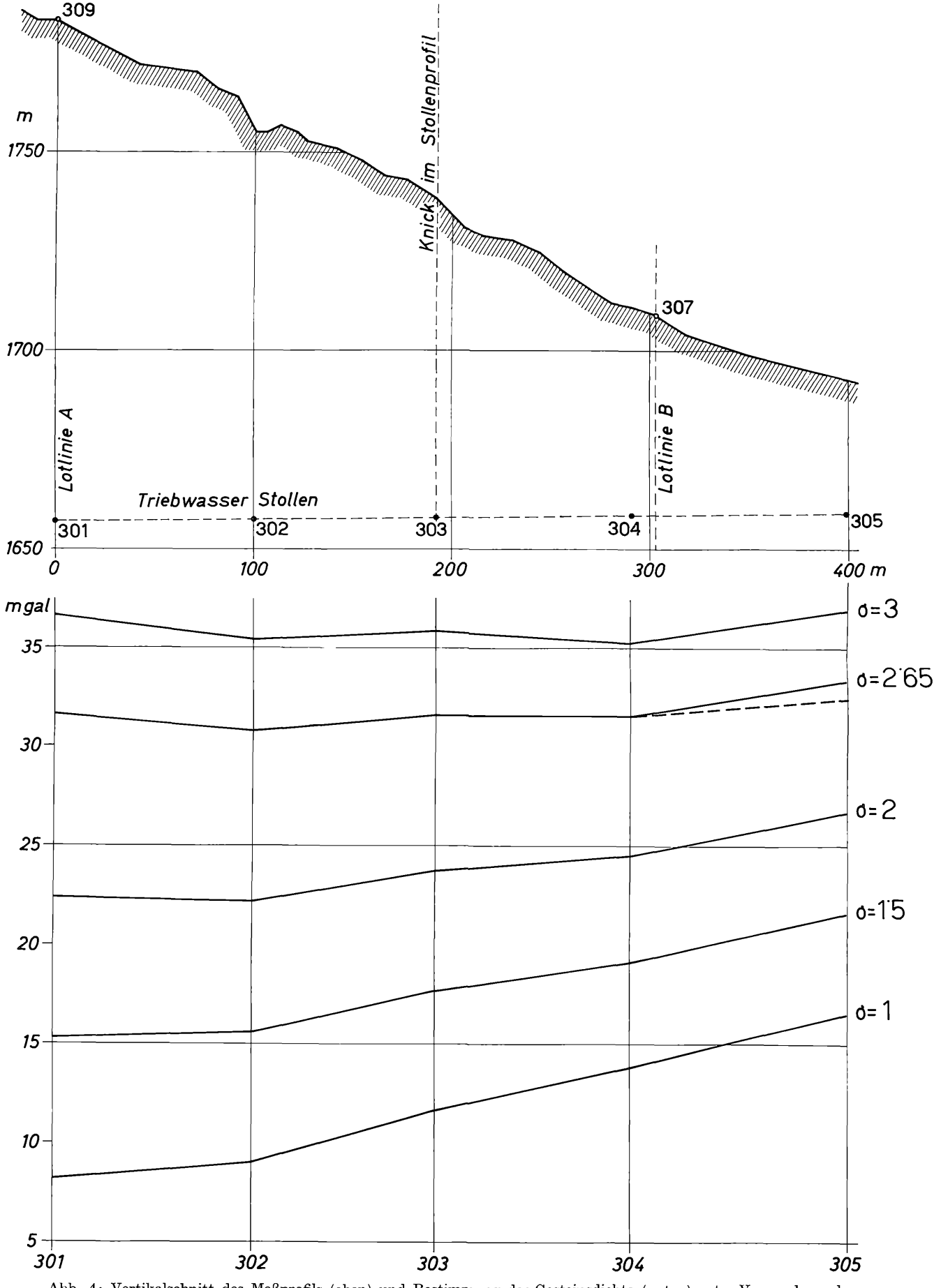

Abb. 4: Vertikalschnitt des Meßprofils (oben) und Bestimmung der Gesteinsdichte (unten) unter Verwendung des Nettleton'schen Prinzips.